



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Painettujen johtimien venymän mittaus 3D-pinnalta

Henri Remes

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2019

TIIVISTELMÄ

Painettujen johtimien venymän mittaus 3D-pinnalta

Henri Remes

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2019, 36 s.

Työnohjaaja yliopistolla: Mika Pylvänäinen

Työn tavoitteena on löytää painettujen johtimien venymien mittaukseen soveltuvia menetelmiä, joiden avulla syntyvien venymien arvot pystytään mittaamaan mahdollisimman tarkasti ja luotettavasti myös 3D-tilanteissa. Aiemmin käytössä olleiden menetelmien avulla venymiä on pystytty tarkastelemaan pääasiallisesti 2D-tilanteissa. Työssä on käytetty apuna aiempien aiheeseen liittyvien tutkimusten tuloksia ja kirjallisuutta. Useita erilaisia menetelmiä löydettiin, joiden avulla venymien mittauksen voisi toteuttaa. Suurin osa näistä menetelmistä kuitenkin oli soveltumattomia johtimien venymien mittaukseen johtuen pääasiassa niiden koosta tai mittatarkkuudesta. Lupaavin menetelmä pohjautuu digitaalisen kuvakorrelaation ja valokenttäkameran yhteiskäyttöön, jonka avulla syntyneitä 3D-muodonmuutoksia voidaan tarkastella koko kappaleen alueella.

Asiasanat: Painettu elektroniikka, elektroniikka, johtimet, venyminen

ABSTRACT

Strain measurement of printed conductors from a 3D surface

Henri Remes

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2019, 36 p.

Supervisor at the university: Mika Pylvänäinen

The aim of this bachelor's thesis is to find suitable methods for measuring the strains of printed conductors, which can be measured as accurately and reliably as possible in 3D situations. Previously used methods have been able to examine strains mainly in 2D situations. The results of researches and literature have been used in this work. A lot of different methods were found to make strain measurements possible. However, most of these methods were unsuitable for measuring the strains of the conductors due to their size or dimensional accuracy. The most promising method is based on the combination of digital image correlation and light field camera, which can be used to measure 3D deformations in the desired area.

Keywords: Printed electronics, electronics, conductors, strain

ALKUSANAT

Työn päätarkoituksena on löytää menetelmiä painettujen johtimien venymien mittaukseen pääasiallisesti 3D-muodonmuutostilanteisiin. Työ on toteutettu ajanjaksolla 1.1. - 17.4.2019. Haluaisin kiittää Oulun yliopistolla työtäni ohjannutta Mika Pylvänäistä ja TactoTek Oy:n asiantuntijana työssä mukana ollutta Janne Asikkalaa, keneltä sain paljon neuvoja ja opastusta liittyen työhöni. Lisäksi haluan kiittää TactoTek Oy:n henkilökuntaa mahdollisuudesta tutustua heidän tiloihinsa ja valmistusprosessiin, jonka avulla sain paremman ymmärryksen kyseisen teknologian valmistuksen vaiheista ja lähtökohdat työn tekemiseen.

Oulu, 15.4.2019

Henri Remes

Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
1.1 Työn tavoite	7
1.2 Työn rajaus	7
2 JOHTAVIEN MUSTEIDEN KÄYTTÖ PAINETUISSA ELEKTRONIIKKAPIIREISSÄ	8
2.1 Yleistä	8
2.2 Käytössä ilmenevät ongelmat	9
3 MENETELMÄT VENYMÄN MITTAUKSEEN	10
4 RFID-TEKNOLOGIAAN PERUSTUVA SISÄINEN VENYMÄANTURI	11
4.1 Yleistä RFID-teknologiasta	11
4.2 Vaatimukset johtimien venymän mittaukseen	12
4.3 RFID-teknologiaan perustuva painettu langaton venymäanturi	12
4.4 Soveltuvuus johtimien venymien mittaukseen	14
5 PAINETTAVA GRAFEENI- TAI HIILIPOHJAINEN VENYMÄANTURI	15
5.1 Grafeenin tai hiilen käyttö venymäantureissa	15
5.2 Grafeeni- ja hiilipohjaiset venymäanturit	16
5.3 Soveltuvuus painettujen johtimien venymien mittaukseen	18
6 DIGITAL IMAGE CORRELATION-TEKNOLOGIA	19
6.1 Yleistä DIC-teknologiasta	19
6.2 DIC-menetelmän käyttö venymätilanteissa	21
6.3 DIC-menetelmän ja valokenttäkameran yhdistelmä	27
6.4 Soveltuvuus venymien mittauksiin	28
7 MITTALAITTEITA VALMISTAVAT YRITYKSET	29
7.1 Correlated Solutions	29
7.2 LaVision	29
7.3 Dantec Dynamics	30
7.4 Raytrix	30
8 YHTEENVETO	31
LÄHDELUETTELO	33

MERKINNÄT JA LYHENTEET

σ ominaissähkönjohtavuus

Ω resistanssi

RFID Radio Frequency Identification

UHF Ultra High Frequency

DIC Digital Image Correlation

DDIC Discontinuous Digital Image Correlation

CCD Charge-Coupled Device

CMOS Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

1 JOHDANTO

1.1 Työn tavoite

Tavoitteena on löytää erilaisia mittausmenetelmiä painettujen johtimien venymän mittaukseen TactoTek Oy:n käyttöön. Löydettyistä menetelmistä TactoTek Oy voi tarkastella menetelmien soveltuvuutta heidän oman tuotannon käyttöönsä. Painettuja johtimia valmistetaan mm. silkkipainomenetelmän avulla, jossa halutun mukainen elektroniikka saadaan painettua esimerkiksi muovipintaisille kalvoille. Tämän jälkeen kyseinen kalvo muokataan haluttuun muotoon käyttökohteen perusteella. Valmis tuote sisältää useasti 3D-muotoja, jolloin muovikalvo ja siihen integroidut elektroniikkajohtimet ovat muodonmuutoksen vuoksi venyneet. Tämän seurauksena johtimina toimivan hopeamusteen poikkipinta-ala pienenee, josta seuraa resistanssin kasvua. Tämä luonnollisesti heikentää elektroniikkakomponenttien toimintaa. Pää tavoitteena työssä on löytää mahdollisimman monta menetelmää 3D-muodonmuutoksen aiheuttaman johtimien venymän mittaukseen. Lisäksi tulee tarkastella löydettyjen mittausmenetelmien soveltuvuutta tuotantoon, virhemarginaaleja ja luotettavuutta.

1.2 Työn rajaus

Työssä etsitään vain mahdollisia menetelmiä venymän mittaukseen johtimissa. Huomiotta jätetään löydettyjen menetelmien tarkemmat kustannusarviot yritykselle, sekä löydettyjen menetelmien perustana olevien algoritmien tarkempi matemaattinen tarkastelu.

2 JOHTAVIEN MUSTEIDEN KÄYTTÖ PAINETUISSA ELEKTRONIIKKAPIIREISSÄ

2.1 Yleistä

Painettavat elektroniikkakomponentit ja niiden sovellutukset ovat nopeasti kasvava teknologian ala nykypäivänä. Useita painotapoja voidaan käyttää, kun luodaan erilaisia johtavia kuvioita ja elektroniikkapiirejä. Painamiseen käytössä olevia menetelmiä ovat mm. silkkipaino-, syväpaino-, fleksopaino-, mustesuihku tulostin- ja litografiatekniikka. Venyvät johtimet ovat kiinnostavia kyseisiin sovellutuksiin, koska ne pystyvät kestämaan suuria mekaanisia muodonmuutoksia, kun niitä käytetään elektroniikassa, jossa rakenne itsessään kokee muodonmuutoksia ilman välitöntä rikkoutumista. Tästä syystä elektroniikka pystytään integroimaan moniin eri sovellutuksiin, esimerkiksi vaatteisiin, jossa kyseisiä mekaanisia muodonmuutoksia syntyy. (Björninen ym. 2010, s. 2001)

Johtimina kyseisissä komponenteissa on hyödyllisintä käyttää johtavia musteita, joista yleisimmin käytetään metallipohjaisia musteita. Itsestään selvää on, että johtavuuden puolesta olisi hyödyllisintä käyttää musteissa korkean johtavuuden omaavia metalleja. Näihin lukeutuvat hopea ($\sigma = 6,3 \times 10^7 \frac{1}{\Omega m}$), kupari ($\sigma = 5,96 \times 10^7 \frac{1}{\Omega m}$), kulta ($\sigma = 4,42 \times 10^7 \frac{1}{\Omega m}$) ja alumiini ($\sigma = 3,78 \times 10^7 \frac{1}{\Omega m}$). Tässä tilanteessa σ tarkoittaa aineen ominaissähkönjohtavuutta, jonka yksikkö on ohmimetrim käänteisarvo ($\frac{1}{\Omega m}$). Nykytilanteessa johtavissa musteissa käytetään yleisimmin hopeaa. Johtuen jalometallien korkeasta hinnasta ne mielellään korvattaisiin kuparilla ja alumiinilla. Kuparin ja alumiinin käyttöön toisaalta liittyvät hapettumisen tuomat haasteet, koska niiden oksidit eivät johda sähköä, kun hopeaoksidit puolestaan ovat johtavia. Eräs korvaaja metallipohjaisille musteille olisi grafeeni- tai hiilinanoputkipohjaiset musteet. Niiden suotuisat elektroniset-, optiset-, ja mekaaniset ominaisuudet tekevät niistä potentiaalisen vaihtoehdon käytettäväksi nano- ja optoelektroniikassa metallien tilalla. (Kamyshny ja Magdassi 2014, s. 3516 - 3517)

Johtavan musteen siirtäminen haluttuun materiaaliin ja siinä onnistuminen riippuu pääasiallisesti kahdesta tärkeästä parametrasta, jotka nesteellä ovat viskositeetti ja pintajännitys. Nesteen viskositeetti määrittää sen kyvyn siirtää mekaanista kuormitusta ja hydrodynaamista painetta materiaaliin nestemäisen vaiheen aikana, kun sitä printataan tietyllä nopeudella. Pintajännitys on myös tärkeä ominaisuus musteelle, koska se on vastuussa musteen jatkuvasta levittäytymisestä materiaaliin sen jälkeen, kun painamisessa apuna käytettävä muotti on poistettu. (Ganz ym. 2016, s. 49)

2.2 Käytössä ilmenevät ongelmat

Johteina käytettävät musteet venyvät, kun painettu elektroniikka muovataan haluttuun muotoon käyttötarkoituksesta riippuen, esimerkiksi sykevyyden valmistuksen yhteydessä. Syntyvän venymän takia johtimien resistanssi kasvaa poikkipinta-alan pienentyessä samalla tilavuus pysyy vakiona, joka johtaa elektronisten ominaisuuksien heikentymiseen tuotteessa.

Moni tutkija on tutkinut venymän vaikutusta sähkönjohtavuuteen. Tilanteessa, jossa polymeerimatriisikomposiittia venytetään, niin rakenteeseen muodostuu monentyyppisiä ilmiöitä. Ilmiöihin lukeutuvat mm. johtavien partikkeleiden muodostaman 3D-matriisin rikkoutuminen, partikkelien välisen kosketuspinnan menetys, delaminointuminen ja partikkeleiden uudelleen järjestyminen. (Björninen ym. 2010, s. 2002)

Kaikilla edellä mainituilla ilmiöillä on vaikutus tuotteen elektronisiin ominaisuuksiin. Tästä syystä johtimissa tapahtuvan venymän mittaukseen tulisi löytää mahdollisimman tarkka, luotettava ja monipuolinen keino, jotta pystytään ennustamaan muodonmuutoksen aiheuttamat muutokset elektronisiin ominaisuuksiin mahdollisimman kattavasti. Tähän mennessä syntyvää venymää on pystytty mittaamaan melko tarkasti 2D-tilanteissa, mutta 3D-muodonmuutoksien tarkastelu on osoittautunut haasteelliseksi johtuen teknologian puutteesta.

3 MENETELMÄT VENYMÄN MITTAUKSEEN

Venymän mittaukseen johtimissa tulisi löytää, kuten aiemmin mainittu, riittävän tarkka, luotettava ja monipuolinen keino. Lisäksi mittauksen toistettavuusaste tulisi olla suuri ja mittaukseen kuluva aika puolestaan mahdollisimman pieni, jotta tuotantovolyyymi saadaan pidettyä mahdollisimman suurena mittauksesta riippumatta. Suurimmat haasteet mittaukseen muodostavat kolmiulotteiset venymät ja venymien suhteellisen pieni mittakaava verrattuna mitattavaan pinta-alaan. Lähtökohtaisesti parhaat tavat mittauksen suorittamiseen olisivat varmasti painetun elektroniikan kanssa muoviin integroitavat venymää mittaavat anturit, joiden tuottama data pystyttäisiin siirtämään langattomasti tietokoneelle tarkasteltavaksi. Painettujen venymäanturien tulisi pystyä mittaamaan venymiä koko rakenteen alueella. Toinen varmasti vartenotettava tapa mittauksen toteuttamiseen liittyisi erilaisten kameroiden käyttöön, jotka pystyisivät kuvaamaan haluttua pintaa alku- ja lopputilanteessa, sekä laskemaan näiden tilanteiden välillä tapahtuneita muodonmuutoksia johtimissa. Kameroiden käyttö venymien mittauksessa olisi todennäköisesti luotettavampi ja kattavampi tapa, kuin painetun elektroniikan mukana integroitavat anturit. Kameroiden käyttöä kyseiseen sovellutukseen rajoittavat ainakin monessa vapausasteessa tapahtuvat muodonmuutokset johtimissa ja lisäksi, että onko kamerateknologia tarpeeksi kehittynyttä nykypäivänä kyseisen tilanteen kuvaukseen.

4 RFID-TEKNOLOGIAAN PERUSTUVA SISÄINEN VENYMÄANTURI

4.1 Yleistä RFID-teknologiasta

”RFID (Radio Frequency Identification) on yleisnimitys radiotaajuuksilla toimiville tekniikoille, joita käytetään tuotteiden ja asioiden havainnointiin, tunnistamiseen ja yksilöintiin. Teknologian toiminta perustuu tiedon tallentamiseen RFID- tunnisteeseen ja sen langattomaan lukemiseen RFID-lukijalla radioaaltojen avulla. Yksinkertaistaen RFID-tunnisteet ovat langattomia muistilaitteita. RFID-järjestelmien idea on yksinkertainen: RFID-tunnisteisiin talletetaan tietosisältö, ne kiinnitetään haluttuihin kohteisiin ja niitä luetaan RFID-lukijoilla, jotka tyypillisesti välittävät tiedot taustajärjestelmiin. RFID-termin alle kuuluu monta erilaista teknologiaa. Esimerkiksi tunnisteen lukuetaisyys ja tunnistamisnopeus vaihtelevat standardeittain.” (RFID Lab Finland ry, 2016)

RFID-teknologia perustuu radioaaltoihin, joiden avulla pystytään siirtämään dataa, luomaan tunnistautumiseen käytettävää teknologiaa ja seurata niin kutsuttuja tägejä. RFID-tägit, jotka välittävät tietyn tyyppistä spesifiä tietoa rakennetaan erityyppisesti. Kyseiset RFID-tägit sisältävät digitaalista informaatiota, joka on varastoitu niissä olevaan integroituun piiriin eli siruun. Tägit ovat yhdistetty puolestaan antenniin. RFID-tägi pystyy olemaan ominaisuuksiensa puolesta joko passiivinen tai aktiivinen. Aktiivinen RFID-tägi on kytkettynä ulkoiseen virtalähteeseen, joka tässä tapauksessa on paristo. Tästä johtuen se on aktiivinen jatkuvasti. Passiivinen RFID-tägi puolestaan toimii vain silloin, kun sen kanssa kytkeytyneenä oleva antenni aktivoi sen. Antenni reagoi sähkömagneettisiin aaltoihin, jotka indusoituvat antenniin. (Ganz ym. 2016, s. 546)

Passiivinen RFID on kiinnostavampi erilaisiin sovellutuksiin, koska se ei vaadi ulkoista energianlähdettä eikä ylläpitoa toimiakseen. Lisäksi tägeillä on rajaton operatiivinen toiminta-aika ja ne ovat tarpeeksi pieniä mahtuakseen käytännölliseen tilaan. Passiivinen RFID-tägi koostuu kolmesta osasta; antennista, antenniin kiinnitetystä puolijohdesirusta ja koteloinnista. Kaksi olennaisesti erilaista RFID mallia löytyy tehon

siirtoon lukijalta tagille; magneettiseen induktioon ja sähkömagneettisiin aaltoihin perustuvat. (Want 2006, s. 25 - 26)

4.2 Vaatimukset johtimien venymän mittaukseen

Kuten Want (2006, s. 25) tutkimuksessaan toi ilmi, että passiivinen RFID ei vaadi ulkoista energianlähdettä, joten tästä syystä keskitytään etsimään passiiviseen RFID-teknologiaan perustuvia tapoja venymän mittaukseen johtimissa. Aktiivinen RFID-teknologia ei ole käytännöllisesti järkevä vaihtoehto venymän mittaukseen, koska sen vaatima ulkoinen energianlähde toisi mukanaan rajoituksia käyttökohteisiin. Painettuun elektroniikkaan liittyvät johtimet ja komponentit ovat sen verran pieniä mittakaavaltaan, että RFID-teknologiaan perustuvan venymäanturin tulisi myös olla kooltaan samaa mittaluokkaa ja näin ollen helposti integroitavissa kyseiseen rakenteeseen.

4.3 RFID-teknologiaan perustuva painettu langaton venymäanturi

Sisäiset ja rakenteisiin integroitavat elektroniikkapiirit ovat yleistyneet vahvasti tilanteissa, joissa halutaan seurata rakenteen tilaa tai ihmisen kehon toimintoja. Uusia kustannuksiltaan edullisia ja huoltotarpeiltaan alhaisia antureita tarvitaan kyseisissä sovellutuksissa jatkuvasti uusia. Monissa tapauksissa olisi hyödyllistä pystyä mittaamaan venymää muiden arvojen ohella. Venymäanturit ovat olleet suuressa kysynnässä monissa infrastruktuurin projekteissa esimerkiksi rakennuksissa ja silloissa, joissa täytyy pystyä mittaamaan rakenteen tilaa tietyllä hetkellä. Anturin elinkaari täytyy olla sama, kuin rakenteen, johon kyseinen venymäanturi on integroitu. RFID-teknologiaa voidaan käyttää hyväksi passiivisissa antureissa. Tilanteissa, joissa käytetään passiivisia RFID-tägejä muotokerroin on pieni ja anturin ulostulo voidaan lukea eri materiaalien läpi. On olemassa kahta eri tyyppiä passiivisista RFID-tägeistä: ensimmäisessä tyypissä on RFID-tägi, jossa on tavallinen anturi. Toisena tyyppinä on tägi, jonka mittaus- ja herkkyyskyky on integroituna tägin rakenteeseen. Toisena mainitussa tyypissä RFID-tägiä käytetään virtalähteenä ja apuna datan siirrossa. (Björninen ym. 2011, s. 32 - 33, Asama ym. 2009)

Asaman ym. (2009), tekemässä tutkimuksessaan he kehittivät venymää mittaavan anturin ulkoisen venymäliuskan ja kahden tagin avulla, joista toinen tuotti virtaa elektroniikan ja venymäliuskan käyttöön ja toisen tagin tehtävä oli siirtää dataa. Anturi testattiin todellisia olosuhteita simuloiden ja signaalien lukemat saatiin kerättyä monen eri rakennuksissa käytettyjen materiaalien läpi onnistuneesti.

Björnisen ym. (2011, s. 33), tekemässä tutkimuksessa tarkoituksena oli kehittää teknologiaa pidemmälle siltä osin, että venymää mittaava anturi ei tarvitsisi erikseen kunnossapitoa ja se saataisiin integroitua osaksi rakennetta käyttäen hyväksi passiivista UHF (Ultra High Frequency) RFID-tägiä. Itsestään havainnoivat tagit ovat helppoja valmistaa. Useita painotapoja mm. silkipaino, syväpaino, flekso-paino, offset-paino ja mustesuihkutulostusta on käytetty RFID-tagien valmistukseen. Lisäksi muita passiivisia mikroaaltopiirejä on valmistettu samojen menetelmien avulla erilaisiin pohjiin ja tämän pohjalta niitä voidaan käyttää apuna halutun sensorin muodostamiseksi.

Yhden valmistetun tagin hinta määräytyy tuotantovolyymin ja käytettyjen materiaalien pohjalta, mutta kustannukset eivät silti ole suurempia kuin kaupallisten painettujen tagien. Mikäli anturi on integroituna esimerkiksi vaatteisiin, niin lisäkustannuksia ei synny ylimääräisten pohjamateriaalien osalta. Yleisimmät ongelmat RFID-teknologiaan liittyen ovat, että laite on herkkä ympärillä oleville materiaaleille. Ongelmia aiheuttavat lisäksi tilanteet, joissa radiosignaalit saavuttavat vastaanottavan antennin kahta tai useampaa eri reittiä pitkin sekä ei-toivottu kytkentä. Tästä huolimatta on saatu aikaiseksi kokeita, joissa mm. lämpötila ja kosteus on saatu mitattua onnistuneesti. (Björnininen ym. 2011, s. 33, Gao ym. 2010)

Björnininen ym. (2011, s. 33), tuo tutkimuksessaan syvällisemmin ilmi kyseisen passiiviseen RFID-tagin toimintaperiaatetta ja käyttötarkoitusta, jota varten se on luotu. Passiivinen UHF RFID-systeemi koostuu datanprosessointiyksiköstä, lukijasta ja tageista. Systeemi on kytketty ja data siirretään sähkömagneettisten aaltojen ja takaisinsironnan avulla. Lukija lähettää kello-signaalin ja käskyn tagille, jonka jälkeen tagi vastaa tähän muuntamalla ja takaisinsirontamalla kantoaallon. Systeemin sisältämä tagi koostuu jälleen tässäkin tapauksessa antennista ja mikrosirusta. Tagi saa tarvitsemansa virran lukijan lähettämistä sähkömagneettisista aalloista. Kyseisessä

tutkimuksessa luotu RFID-teknologiaan perustuva anturi on kykenevä mittaamaan suuria siirtymiä ja se voidaan sulauttaa toiseen rakenteeseen.

Björnisen ym. (2011, s. 39) tutkimuksessa käy ilmi, että mikäli tarvittaisiin herkempää anturia, kuin kyseisessä tutkimuksessa luotu niin johtimina käytetyn musteen ominaisuuksia voitaisiin muokata ja näin ollen saavuttaa kyseisen tapainen anturi. Herkkyyttä voidaan parantaa pienentämällä hiukkasten tilavuusfraktiota perkolaatiokynnykseen. Tässä tapauksessa olisi mahdotonta enää mitata suuria venymiä. Toinen mahdollinen tapa on muokata tägin rakennetta siten, että se olisi herkkä pienten venymien suhteen. Tämän tapainen rakenne onkin suunnitelmissa rakentaa tulevilla tutkimuksissa.

4.4 Soveltuvuus johtimien venymien mittaukseen

Esitetyn tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että RFID-teknologiaan perustuva venymäanturi johtimien venymän mittaukseen ei ole vielä tarpeeksi kehittynyttä teknologiansa puolesta, jotta halutut muutokset johtimissa voitaisiin selvittää tarpeeksi tarkasti. Kyseinen teknologia tulee varmasti tulevaisuudessa kehittymään siten että myös pienten venymien, kuten nanomittakaavan venymien mittaus tulee mahdolliseksi. Tällä hetkellä kyseisen tyyllisiä venymä antureita on käytetty esimerkiksi rakenteissa syntyvien venymien mittaukseen. Kyseisten tilanteiden venymät ovat mittakaavaltaan paljon suurempia, kuin johtimissa tapahtuvat. Lisäksi RFID-venymäanturin kyky mitata venymää vain melko paikallisesti ei palvele tässä tapauksessa tilannetta, jossa venymiä halutaan mitata koko kappaleen alueella.

5 PAINETTAVA GRAFEENI- TAI HIILIPOHJAINEN VENYMÄANTURI

5.1 Grafeenin tai hiilen käyttö venymäantureissa

Verrattuna tavallisiin johtaviin täyteaineisiin hiilipohjaiset nanoputket omaavat ainutlaatuisia ominaisuuksia esimerkiksi hyvät mekaaniset ominaisuudet, suuren sähkönjohtavuuden ja lämpöstabiliteetin. Nanokomposiitit tarjoavat mielenkiintoisen lähestymistavan suurten pinta-alojen jännitysenturien toteutukseen, kun nanokomposiittien avulla muodostetaan pietsoresistisia kalvoja. Näiden avulla voidaan muodostaa antureita, joilla on suuri herkkyys ja alhaiset valmistuskustannukset. Polymeeripohjaiset nanokomposiitit, joissa on käytetty johtavana täyteaineena hiilinanopartikkeleita, voidaan kiinnittää joustaviin alustoihin ja tämä johtaa mekaanisesti joustaviin kerroksiin. Tämän tyyppiset anturit mahdollistavat venymän mittauksen tietyltä pinnalta kokonaisuudessaan tai paikallisen mittauksen tietyltä paikalta riippuen anturin geometriasta. Kyseisen tyyppiset venymäanturit, jotka perustuvat hiilipohjaisiin nanorakenteisiin pystyvät suoriutumaan useista rajoitteista, jotka tulevat esille käytettäessä tavanomaisia venymäantureita. Näihin rajoitteisiin lukeutuvat mm. herkkyys, säädettävä mittausalue ja isojen pintojen kokonaisvaltainen mittaus. (Al-Hamry ym. 2014, s. 10042)

Grafeeni on kaksiulotteinen ja rakenteeltaan heksagoninen kennosto. Vetojännityksen alaisena kennostorakenne osittain tuhoutuu reunoilta. Tämä johtaa muutoksiin elektronisiin ja sähkönjohtavuuteen vaikuttavissa ominaisuuksissa, joka aiheuttaa merkittäviä muutoksia resistanssiin grafiitissa. Monen ominaisuuden, kuten suuren läpikuultavuuden, suuren mekaanisen joustavuuden, vakauden ja palautumiskyvyn ansiosta grafeenia voidaan käyttää suuren herkkyyden omaavissa venymäantureissa. Kyseenomaisia antureita voidaan käyttää tulevaisuudessa esimerkiksi robotiikassa, elektronisissa ihoissa, jotka pystyvät matkimaan ominaisuuksiltaan ihmisen ihoa ja lisäksi antureita voidaan käyttää hyödyksi ihmisten fysiologisten liikkeiden havaitsemisessa. (Li ym. 2014, s. 4666)

Nanomittakaavan materiaalit ovat osoittaneet lupaaviksi materiaaleiksi käytettäväksi innovatiivisissa venymääntureissa, jotka omaavat paranneltuja ominaisuuksia. Aiemmin on raportoitu laitteista, joissa on käytetty nanorakenteina mm. nanopartikkeleita, nanolankoja, nanoputkia ja grafeenia. Varsinkin grafeeniset nanokerrokset, jotka omaavat erikoislaatuiset sähköiset- ja mekaaniset ominaisuudet ovat olleet kattavasti tutkimuksen kohteena venymäsovellutuksissa. Pietsoresistinen yhden molekyylin paksuinen kerros grafeenia on ollut käytössä tutkittaessa venymän havaitsemiseen soveltuvia menetelmiä. Kuitenkin, grafeenisia kerroksia voidaan venyttää todella rajoittuneesti noin 6%:iin asti, jonka jälkeen venyttäminen ei ole mahdollista. Kunnollinen rakenteellinen suunnittelu, kuten kuhmuisen rakenteen luominen perinteisen jäykän rakenteen tilalle on laajasti käytetty menetelmä venyvien ja taipuvien elektroniikkalaitteiden yhteydessä. Kyseisen menetelmän avulla grafeenin venyvyyttä voidaan parantaa 25-30% asti. (Chee ym. 2014, s. 2022)

5.2 Grafeeni- ja hiilipohjaiset venymäänturit

Chee ym. (2014, s. 2022 - 2026), tekemässä tutkimuksessa tarkoituksena oli parantaa grafeenipohjaisen venymäänturin venyvyyttä 6%:sta aina 100%:iin asti käyttäen apuna nanoselluloosaa. Kyseisessä tutkimuksessa kolmiulotteisia makrohuukoisia nanopapereita käytettiin yhdessä poimutetun grafeenin ja nanoselluloosan kanssa, jotka sulautettiin venyvään elastomeerimatriisiin ja näin saatiin luotua tutkimuksessa käytetty venymäänturi. Kyseisen tutkimuksen tekoaikaan grafeenipohjaisten venymäänturien, joiden venymäkyky olisi yli 50% olivat todella vaikeasti löydettävistä. Tutkimuksessa huomattiin, että venyvät grafeenipohjaiset nanopaperianturit ovat kykeneviä tunnistamaan venymää x-, y- ja z-koordinaatiston suunnissa. Yhteenvedossään tutkimusryhmä ilmoittaa onnistuneesti lisänneensä venyvyyttä 6%:sta aina 100%:iin asti. Verrattuna tavallisiin metalli- ja puolijohdepohjaisiin laitteisiin venyvä nanopaperianturi mahdollistaa x-, y- ja z-koordinaatiston suuntaiset tunnistukset, mikä on kriittisen tärkeää mm. ihmisten liikkeiden tunnistamiseen käytettävien laitteiden valmistuksen kannalta. Helppo, edullinen ja helposti muovattavissa oleva menetelmä mahdollistaa grafeenipohjaisten anturien valmistuksen ihmisten interaktiivisille sovellutuksille, joissa tarvitaan korkeaa venymänmittauskykyä.

Ahn ym. (2013, s. 236 - 242) muodostivat tutkimuksessaan läpinäkyviä venymäantureita, jotka olivat grafeenipohjaisia. Kyseiset venymäanturit rakennettiin ruusukkeen muotoiseen asetelmaan taipuisalle muovialustalle tai venyvälle kumialustalle reaktiivisen etsauksen ja leimaustekniikan avulla. Anturien pietsoresistisiä ominaisuuksia tutkittiin vetolujuuden alaisena. Lisäksi he esittelivät anturin läpinäkyvyyttä läpinäkyvän käsineen avulla ja mittasivat pääasiallisten venymien suuruutta ja suuntaa käsineessä, kun käyttäjä liikuttaa sormiaan. Tutkimuksessaan he käyttivät tavanomaista optista fotolitografiaa grafeenikalvojen kuviointiin ja sen jälkeen reaktiivista etsausta, jonka teho oli 100 W ja happimolekyyliä (O_2) etsauskaasuna saadakseen halutun muodon ja ulottuvuuden grafeenikalvolle. Tämän jälkeen he kiinnittivät polydimetyylisiloksaani-kalvon, jonka paksuus oli 2 mm kuvioidulle grafeenille Ni/SiO₂/Si-substraatilla. Kuvioitu grafeeni siirrettiin tämän jälkeen polydimetyylisiloksaani-kalvolle etsaamalla Ni/SiO₂-kerros. Tämän jälkeen se altistettiin yksiaksiaaliselle vetolujuuskokeelle. Lisäksi he valmistivat kahdenlaisia grafeenipohjaisia venymäantureita ruusukkeen muotoiseksi, jossa kolme identtistä venymäanturia asetettiin tasasivuiselle kolmiolle 120° kulmaan. Kahdentyyppiset grafeenipohjaiset venymäanturit olivat identtiset muodoiltaan ja dimensioiltaan, mutta molemmissa käytetyn polydimetyylisiloksaani-kalvon paksuus oli eroava, koska oli välttämätöntä tutkia grafeenipohjaisten anturien toimintoja riippuen kalvon paksuudesta kokeellisissa demonstroinneissa. Tutkimuksen lopputuloksissa ilmoitetaan heidän luoneen onnistuneesti läpikuultava ja venyvä venymäanturin, jonka pietsoresistisiä ominaisuuksia tutkittiin venytyksen aikana. Tulokset osoittavat, että ei-monotoninen resistanssi muuttuu vetolujuudella 7,1%:iin asti. Tämä kyseisen anturin ei-lineaarinen käyttäytyminen johtuu vikojen ja mikrohalkeamien muodostumisesta. He onnistuivat myös luomaan läpinäkyvän ruusukkeen muotoisen venymäanturin, joka integroitiin osaksi läpinäkyvää käsinettä. Tämän avulla he pystyivät ylittämään vain yhden venymäanturin käytöllä syntyvät ongelmat ja havaitsemaan samanaikaisesti päävenymien suuruuden ja suunnan, joka aiheutui sormen taivutusliikkeen seurauksena.

5.3 Soveltuvuus painettujen johtimien venymien mittaukseen

Kuten RFID-teknologiaan perustuvat venymäanturit, niin myös grafeeni- ja hiilipohjaiset venymäanturit ovat nopeasti kasvava ja laajasti tutkimuksen alla oleva teknologia. Varsinkin niiden erinomaiset mekaaniset ja elektroniset ominaisuudet tekevät niistä todella mielenkiintoisia vaihtoehtoja normaaleille venymäantureille. Grafeeni- ja hiilipohjaiset venymäanturit ovat tutkimusten perusteella osoittaneet hyödyllisyytensä varsinkin lääketieteen eri sovellutuksissa esimerkiksi ihmisten liikkeiden tunnistuksessa. Painetun elektroniikan ja siihen liittyvien johtimien venymän mittaukseen kyseisen tyyppiset venymäanturit voisivat tarjota myös vartenotettavan mahdollisuuden. Ongelmaksi kyseisten anturien käytössä nousee jälleen esille niiden koko, mikä mahdollisesti on liian suuri niiden käyttökohteeseen nähden. Lisäksi monessa tutkimuksessa on raportoitu kyseisten anturien avulla toteutetuista venymämittauksista, jotka keskittyvät juurikin ihmisten liikkeiden aiheuttamien muutosten havaitsemiseen. Kyseiset liikkeet ovat huomattavasti suurempia, kuin painetuissa johtimissa tapahtuvat venymät prosessin aikana, jossa venymät ovat mittaluokaltaan todella pieniä. Kyseisten grafeeni- tai hiilipohjaisten venymäanturien integroimisella tarkasteltavaan rakenteeseen voi olla negatiivisia vaikutuksia kappaleen elektronisiin ominaisuuksiin.

6 DIGITAL IMAGE CORRELATION-TEKNOLOGIA

6.1 Yleistä DIC-teknologiasta

Digital image correlation (DIC) eli digitaalinen kuvakorrelaatio, joka tunnetaan myös nimillä kuvakorrelaatio ja pistekorrelaatio on menetelmä, jossa käytetään digitaalista kuvankäsittelyä venymien mittaukseen kappaleen pinnalta. Pistekorrelaatio -menetelmässä, sattumanvarainen pistekuviointi luodaan lasersäteiden avulla. Digitaalinen kuvakorrelaatio-menetelmä luotiin Etelä-Carolinan yliopistossa 1980-luvulla, jonka jälkeen kyseistä menetelmää on paranneltu usean tutkijan toimesta. Kyseinen menetelmä pystyy mittaamaan tasossa tapahtuvia siirtymiä, kun käytetään avuksi yhtä kameraa. Siirtymien jakautumista kolmiulotteisella pinnalla voidaan mitata käyttäen apuna useampaa kameraa. (Yoneyma S. 2016, s. 105, Peters ym. 1981, Knauss ym. 1998, Chao ym. 1993)

Siirtymät havaitaan suoraan kuvista digitaalisessa kuvakorrelaatio-menetelmässä. Tästä syystä on vaikea saavuttaa suuren tarkkuuden mittausta, kuten venymäanturin ja optisen interferometrian avulla. Kuitenkin, digitaalisen kuvakorrelaatio-menetelmän käyttö on yleistynyt. Lisäksi tämän menetelmän vaatimuksista kuulee usein puhuttavan, koska kyseinen menetelmä ei vaadi monimutkaisia asetuksia. Se mahdollistaa kokonaisvaltaisen siirtymien ja venymän mittauksen yksinkertaisesti. Ammattilaisten käytössä olevat ohjelmistot ovat vaikeammin saatavilla johtuen niiden hintatasosta. Digitaalisen kuvakorrelaatio-menetelmän käyttämä ohjelmisto voidaan ohjelmoida käyttämällä hyödyksi esimerkiksi ohjelmointikieli C:tä, mikäli menetelmän periaate tunnetaan. Menetelmässä syntyvät siirtymät selvitetään kuvasarjojen avulla, jotka on otettu kappaleen pinnasta ennen ja jälkeen muodonmuutoksen digitaalisen kameran avulla. Tämä toimintaperiaate perustuu olettamukseen, että piirteet kappaleen pinnassa ovat siirtyneet yhdessä pinnan kanssa ja ne säilyvät pinnassa muodonmuutoksen jälkeen. Tämän johdosta etsitään alue, jossa harmaaväriskaalan jakauma on sama kuin harmaaväriskaala aineessa ennen muovautumista ja näin saadaan määritettyä syntyneet siirtymät. Tästä syystä kappaleen pinnassa tulee olla kuviointi. Tapauksessa, jossa kohteen pinnalla ei havaita mitään piirteitä tulee pinnalle asettaa keinotekoinen kuvio.

Digitaaliset monokromaattiset kuvat, jotka on otettu ennen ja jälkeen muodonmuutoksen kappaleen pinnalta, jossa on sattumanvarainen kuviointi ovat apuna kappaleen pinnassa tapahtuvien siirtymien määrittämisessä. Kappaleen pinnalla oleva sattumanvarainen kuviointi kvantisoidaan tasoiksi ristikkomaisilla näytteenottopisteillä kaksiulotteisessa tasossa. (Yoneyama S. 2016, s. 106)

Mikäli halutaan saavuttaa luotettavia tuloksia DIC-menetelmän käytöllä, niin tulee tarkastelun kohteena olevan pinnan osajoukon olla riittävän suuri, jotta osajoukossa oleva kuvio erottuu tarpeeksi selkeästi muista alueista. Tämän vuoksi suositetaan suuren osajoukon käyttöä kappaleen pinnalta. Toisaalta on huomattu, että pienen osajoukon alueella oleva muodonmuutoskenttä voidaan helposti ja tarkasti approksimoida ensimmäisen tai toisen osajoukon avulla, kun taas suurempi osajoukon koko johtaa tavallisesti suurempiin virheisiin. Tästä syystä, jotta saadaan selville siirtymien tarkat arvot, niin tulisi käyttää pientä osajoukon kokoa DIC-menetelmässä. (Pan ym. 2008, s. 7038)

Kappaleen pinta tulisi valottaa jollakin valonlähteellä, jotta saadaan aikaiseksi korkean kontrastin omaavia kuvia. Valonlähteiden käyttö ei aina välttämättä ole tarpeen, mikäli riittävä valoisuus on saavutettu ilman niiden käyttöä. Korkea resoluutioista ja mittaukseen tarkoitettua monokromaattista CCD-kennon tai CMOS-kennon sisältävää kameraa tulisi käyttää kuvien ottamiseen. Tietysti suurnopeuskameraa käytetään, kun kuvauksen aikana tapahtuu erittäin nopeita liikkeitä. Värikamera on hyödyllinen kuvien ottoon, mutta toisaalta mittaustarkkuus heikkenee käytettäessä yhtä CCD-tyypin värikameraa. Monella kameralla värisyvyys on 8-bittä. Harmaan arvot ovat ilmaistu 256 eri portaan avulla, jossa skaala menee 0-255. Kuten aiemmin mainittu, niin korkean tarkkuuden omaavia kameroita, kuten 12- ja 16-bittisiä tulisi käyttää jokaisessa tilanteessa, mikäli mahdollista. Näin varmistetaan korkealaatuisten kuvien saaminen, joiden pohjalta voidaan tarkastella tarkkoja tuloksia. Suurentavien linssien käyttöä tulisi välttää, koska kyseisen tyyppisen linssin käytöllä vääristymien syntyminen on mahdollista. Tästä syystä yksitehoisten linssien käyttöä tulisi suosia vahvasti. Linssin vääristymän ja sen mahdollisen korjaustavan tulisi olla esitettynä, mikäli vääristymä vaikuttaa mittaustulokseen. (Yoneyama S. 2016, s. 117, Kikuta ym. 2006)

Välttämätöntä on muodostaa kappaleen pintaan sattumanvarainen kuviointi, mikäli mittauksen alaisena olevan kappaleen pinnassa ei sellaista etukäteen ole. Helpoin tapa muodostaa kyseisen tapainen kuviointi on spray maalauksen avulla. Kyseistä kuviointia kutsutaan joskus nimellä pistekuviointi, koska muodostettu sattumanvarainen kuvio muistuttaa usein lasersäteiden häiriökuvion pisteitä. Laadukkaita tuloksia ei voida saavuttaa, mikäli kuvio on liian hienojakoinen tai karkea. Koko ja suurennos ovat säädetty yhden kuvion digitalisoimiseksi useiden anturien avulla, esimerkiksi 3×3 pikseliä. Mikäli mikroskooppia käytetään avuksi kuvien muodostamiseen, on käytettävä hienojakoista kuviointia kappaleen pinnassa. (Yoneyama S. 2016, s. 117)

6.2 DIC-menetelmän käyttö venymätilanteissa

Kappaleessa on tarkoituksena tutustua tarkemmin DIC-menetelmän avulla tehtyihin tutkimuksiin ja siihen, kuinka tarkasti ja miten kyseisen menetelmän avulla siirtymiä voidaan mitata kappaleiden pinnalta. Esiteltynä on myös tärkeimmät eroavaisuudet 2D-DIC- ja 3D-DIC-menetelmien välillä. Lisäksi mainitaan DIC-menetelmän käyttämiä algoritmeja pintapuolisesti, sekä menetelmän toimintoihin vaikuttavia tekijöitä ja haasteita käytössä.

Kuten Cheng ym. (2015, s. 73) toteavat, niin laskennallinen tehokkuus ja mittaustarkkuus, jotka kuuluvat olennaisesti DIC-menetelmään ovat tulleet koko ajan tärkeämmäksi kuluneina vuosina. Kolmiulotteiseen DIC-menetelmään liittyvät kysymykset ovat paljon haasteellisempia. Ensinnäkin siinä käytetään kahta kameraa, jotka lisäävät laskennallista tehoa moninkertaiseksi. Toiseksi, koska kuvauskulmat eroavat toisistaan käytettäessä kahta eri kameraa, niin pakollinen stereovastaavuus vasemman ja oikean kuvan välillä on vastaavasti epäyhtenäinen muodonmuutokseen, eikä sitä voida heikentää lisäämällä käytössä olevien digitaalikameroiden näytteenottotaajuutta. Heidän tutkimuksensa keskittyy pääasiassa 3D-DIC-menetelmän tehokkuuden ja tarkkuuden tarkasteluun. Ensimmäiseksi on esitelty käänteinen kokoava Gauss-Newton algoritmi (IC-GN²), joka sisältää toisen kertaluvun muotofunktion. Sen sisältämän toisen kertaluvun siirtymägradientin vuoksi epätasaisen muodonmuutoksen mittaustarkkuutta voidaan parantaa merkittävästi, joka on tyypillisesti yhden kertaluvun suurempi kuin ensimmäisen kertaluvun muotofunktio yhdistettynä IC-GN-algoritmiin

(IC-GN¹) ja kaksi kertaa nopeampi kuin toisen kertaluvun muotofunktio yhdistettynä FA-GN² Gauss-Newton algoritmiin. Viime vuosina DIC-menetelmän tutkimukset ovat keskittyneet pääasiassa laskennalliseen tehokkuuteen ja mittaustarkkuuteen. Laskennallisen tehokkuuden aiheena on ollut kymmenet tuhannet pisteet, jotka tulee analysoida jopa yhdestä muodonmuutoksesta. Johtuen digitaalisten kameroiden kehityksestä, pistekuvioinnin sisältämien pisteiden lukumäärä kappaleessa kasvaa vuosi vuodelta. Lisäksi mittauksiin on yleensä tallennettu kymmeniä tuhansia deformaatioita kuvia, kuten dynaamisen testauksen tai reaaliaikaisen liiketunnistuksen yhteydessä. Laskennallisen tehokkuuden aiheuttamia kustannuksia DIC-menetelmässä on tästä syystä yleisesti pidetty todella suurena.

DIC-menetelmä voidaan yleisesti ottaen luokitella joko kaksiulotteiseen (2D-DIC) tai kolmiulotteiseen (3D-DIC). 2D-DIC käyttää kuvauksessa apuna vain yhtä kameraa ja se on pätevä vain tasossa tapahtuvien muodonmuutosten tutkimiseen. 2D-DIC-menetelmän sisältävien rajoitusten voittamiseksi on luotu 3D-DIC-menetelmä, joka perustuu syvyysnäön käyttöön. Käyttämällä kahta synkronoitua kameraa 3D-DIC menetelmä kykenee mittaamaan niin 3D-muotoja, kuin myös näytteen pintojen kolmea siirtymäkomponenttia. Kyseisen menetelmän avulla voidaan määrittää niin tason suunnassa, kuin tason suunnasta eroavat muodonmuutokset ja juuri tästä syystä 3D-DIC-menetelmää pidetäänkin käytännöllisempänä ja tarkempaa 2D-DIC-menetelmään verrattuna. (Cheng ym. 2015, s. 73, Asundi ym. 2009, Orteu 2009, Orteu ym. 2008)

Tarpeellista on kuitenkin huomata, että vaikka 3D-DIC-menetelmä tuo mukanaan paljon etuja niin siihen liittyvät haasteet laskennallisessa tehokkuudessa ja mittaustarkkuudessa ovat paljon vakavampia, kuin 2D-DIC-menetelmässä. Ensinnäkin, 3D-DIC-menetelmä on laskennallisesti kolme kertaa raskaampi, kuin 2D-DIC-menetelmä johtuen sen käyttämisestä kahdesta kamerasta. Toiseksi, johtuen 3D-DIC-menetelmän käyttämien kameroiden eroavista kuvakulmista on vasemman ja oikean puolen samaan aikaan otetuissa kuvissa eroavaisuuksia. Esimerkiksi muodonmuutoksen vaihtelu yksittäisessä osajoukossa, jonka koko on 49 pikseliä, on jopa 1,4%, kun vasemman ja oikean puolisen kameran välinen kulma on tyypillisesti 40°. (Cheng ym. 2015, s. 73 - 74)

Cheng ym. (2015, s. 73 - 80) tekemässä tutkimuksessaan tavoitteena oli keskittyä pääasiassa 3D-DIC-menetelmän tehokkuuteen ja tarkkuuteen. Johtuen

stereovastaavuudesta, joka on pakollinen tehdä vasemman ja oikean puolen kuvien välille johtuen niiden eroavaisuuksista, tutkimuksessa esitellään uusi IC-GN algoritmi, joka sisältää toisen kertaluvun muotofunktion ($IC-GN^2$) ja sen avulla pyritään saamaan korkean mittatarkkuuden tuloksia epäyhdenmukaisissa muodonmuutostilanteissa. Lopputuloksessa he toteavat, että Hessian-matriisin toistuva arviointi kussakin iteroinnissa on eliminoitu ja IC-GN algoritmin toisen kertaluvun muotofunktio on johdettu. Tutkimuksessaan he käyttivät teoreettisia ja kokeellisia menetelmiä ehdotetun $IC-GN^2$ -algoritmin tehokkuuden ja tarkkuuden vahvistamiseksi, kun sitä vertailtiin tavallisiin $FA-GN^1$, $FA-GN^2$ ja $IC-GN^1$ -algoritmeihin. $IC-GN^2$ -algoritmillä on korkein tarkkuus ja toiseksi nopein tehokkuus kaikkien neljän algoritmin joukosta. Tyypillisesti tarkkuus on yhden asteen suurempi, kuin $IC-GN^1$ -algoritmillä ja tehokkuus noin kaksi kertaa suurempi kuin $FA-GN^2$ -algoritmillä. $IC-GN^1$ -algoritmi omistaa suurimman tehokkuuden ja toiseksi suurimman tarkkuuden kaikkien verrattujen joukosta. Perustuen $IC-GN^1$ ja $IC-GN^2$ -algoritmien ominaisuuksiin, korkean tarkkuuden ja tehokkuuden mittaussstrategia 3D-DIC-menetelmälle on esiteltynä johtopäätöksessä. $IC-GN^2$ -algoritmia käytetään kerran ensimmäisessä stereoparissa. Tämän jälkeen saatuja vasemmanpuoleisia kuvia verrataan referenssikuviiin käyttäen apuna $IC-GN^1$ -algoritmia. Oikeanpuoleisille kuville tehdään sama operaatio kyseisen $IC-GN^1$ -algoritmin avulla.

Hassan (2019, s. 208) kertoo tutkimuksessaan, että muodonmuutosmittaus pystytään normaalisti toteuttamaan digitaalisen kuvakorrelaatio-menetelmän avulla, mikäli muodonmuutos ei ole epäjatkuva. Epäjatkuvuuksien läsnäolo tekee tarkasteltavasta muodonmuutosprosessista erittäin haastavan ja DIC-menetelmä epäonnistuu siirtymien mittauksessa. Uusi innovatiivinen tekniikka on esitelty kyseisessä tutkimuksessa, joka jakaa mittauksessa käytettävän osajoukon, eli segmentin, useisiin osiin ja käyttää segmentoitua osajoukkoa korrelaatioprosessia varten. Ehdotetun tyyllisen tekniikan suorituskkyä arvioidaan erilaisia kokeita hyväksi käyttäen, joissa muodonmuutosprosessiin lisätään eri tyyppisiä epäjatkuvuuksia eri kulmilla ja suuruuksilla. Saatuja tuloksia verrataan äskettäin esiteltyyn epäjatkuvaan digitaaliseen kuvakorrelaatio-tekniikkaan. Saadut tulokset osoittavat, että ehdotettu tekniikka on

luotettavampi ja sillä on korkea tarkkuus, jolla saavutetaan suotuisissa olosuhteissa jopa sadasosapikselin tarkkuus.

Viime aikoina on esitelty uusi tekniikka, joka tunnetaan nimellä Discontinuous Digital Image Correlation (DDIC), eli epäjatkuva digitaalinen kuvakorrelaatio. Kyseisessä tekniikassa epäjatkuvuuksien oletetaan sijaitsevan tarkasteltavassa osajoukossa, joka aina ylittää osajoukon keskipisteen. Esitelty DDIC-tekniikka vaatii yhdeksän muuttujan optimoinnin, joista kuusi ovat säännöllisiä DIC-muuttujia. Jäljelle jäävät kolme ovat epäjatkuvuusmuuttujia. Optimointiprosessia seuraa algoritmi, jonka avulla mitataan epäjatkuvuuden alueella olevien pisteiden muodonmuutoksia, jossa optimointi epäonnistuu. DDIC-tekniikan raportoidaan antavan suurta mittaustarkkuutta laskennallisen monimutkaisuuden hinnalla. (Hassan G.M., 2019, s. 209. Dyskin ym. 2018)

Hassanin (2019, s. 214 - 215) tekemän tutkimuksen pohdintaosiossa hän toteaa uuden DIC-menetelmään pohjautuvan osajoukkoalgoritmin toimineen onnistuneesti kaikkien suoritettujen kokeiden tilanteissa. Kokeissa käytettiin erityyppisiä epäjatkuvuuksia, jotka poikkesivat ominaisuuksiltaan toisistaan. Saadut tulokset osoittavat, että uudella algoritmilla on vähän vikoja verrattuna DDIC-tekniikkaan. Standardipoikkeama on kuitenkin suurempi erityisesti vaakasuunnassa tarkasteltavalla epäjatkuvuusalueella. Keskimääräisten absoluuttisten virheiden korkean standardipoikkeaman syynä voi olla kaksi tekijää. Ensimmäinen on se, että dislokaation epäjatkuvuus on yhtenäinen ja esitetyn tekniikan epäonnistuminen johtaa kiinnostuksen kohteena olleen kohdan siirtymisen väärään suuntaan, mikä aiheuttaa virheitä, jotka ovat suuruusluokaltaan suunnilleen kaksikertaisia verrattuna esiteltyyn muodonmuutokseen. Tämä johtaa korkeaan standardipoikkeamaan. Toinen syy on DISTRESS-simulaattorissa, jota on käytetty kyseisen tutkimuksen aikana, kun on luotu tarkasteltavia muodonmuutostilanteita. Tutkimuksessa todetaan, että DISTRESS-simulaattori toimii olettamuksella, että luodun pistekuvioinnin pisteet ovat pieniä, eivätkä ne muuta muotoaan prosessin aikana. Näin ollen jokainen pisteiden läpi kulkeva epäjatkuvuus ei jaa pisteitä ja siirtää koko pisteen jommallekummalle puolelle epäjatkuvuutta. Kyseinen oletus toimii hyvin jatkuvan muodonmuutoksen tilanteessa, mutta luo pienen ongelman, kun epäjatkuva muodonmuutostilanne otetaan käyttöön. Lopulliset tulokset osoittavat,

että esitelty uuden tyyppiseen algoritmiin perustuva tekniikka mittaa onnistuneesti siirtymät niin vaaka- kuin pystysuunnassakin yli kymmenesapikselin tarkkuudella. Lisäksi vertailutilanteessa, jossa kyseistä tekniikkaa verrattiin DDIC-tekniikan tuloksiin saadut tulokset osoittavat, että ehdotettu tekniikka toimii paremmin ja sillä on alhaiset virheet.

Seuraavassa kappaleessa tarkoituksena on esitellä tutkimus, joka käy läpi tekniikka, jolla siirtymiä voidaan mitata mikro- ja nanomittakaavassa sekä kyseiseen mittaustekniikkaan vaikuttavia tekijöitä.

Berfield ym. (2007, s. 51) toteavat, että DIC-menetelmää voidaan käyttää menestyksekkäästi useissa eri pituusskaaloissa, kunhan vain muodostetaan tilanteeseen sopiva pistekuvio mittauksen kohteena olevan kappaleen pinnalle. Mikromittakaavan mittauksiin muodostettava pistekuviointi kappaleeseen luodaan kyseisessä tutkimuksessa kynäruiskun avulla. Nanomittakaavan siirtymien mittaukseen sopiva pistekuviointi muodostetaan fluoresoivan piidioksidin nanohiukkasliuoksen kerrostumisella. Hiukkasten virittyessä ne fluoresoivat ja muodostavat pistekuvion, joka voidaan kuvata optisella mikroskoopilla. Siirtymät mitataan ulko- sekä sisäpinnalta läpinäkyvistä polymeerinäytteistä, joissa on erilaiset pistekuvioinnit. Jäykän rakenteen kääntökalibroinnit ja yksiaksiaaliset jännityskokeet osoittavat pinnan siirtymien resoluutioksi 1 μm , kun tarkastelualue on 5×6 mm kokoinen ja pistekuviointi luotu kynäruiskun avulla. Vastaavasti 17 nm:n resoluutio saadaan aikaiseksi, kun tarkastelualue on 100×100 μm kokoinen ja pistekuviointi on luotu fluoresoivien nanopartikkeleiden avulla. Menetelmän kyvykkyyden osoittamiseksi he karakterisoivat elastomeeriin sulautettujen piidioksidimikropartikkeleiden ympärillä syntyvät muodonmuutoskentät vetojännityksen aikana. DIC-menetelmä mahdollistaa monimutkaisten muodonmuutoskenttien mittaamisen tarkasti nanomittakaavassa suhteellisen suurilla alueilla, mikä tekee siitä erityisen merkittävän materiaaleille, jotka omaavat useita pituusmittakaavoja.

Pistekuviointi, joka on sopiva DIC-menetelmälle ja jonka avulla kuvantarkkuudeksi saadaan 3-10 μm /pikseli asetettiin polyeteeni-hiilimonoksidikopolymeeri kalvoille käyttäen avuksi kynäruiskua. Kyseisen kynäruiskun suuttimen halkaisija oli

halkaisijaltaan 0,18 mm, mikä mahdollistaa paremman maalin levittäytymisen ja näin ollen pienemmät pisteet. Lisäksi painovoimaa hyväksi käyttäen ja yhdistettynä käytetyn musteen kevyeen painoon saatiin aikaiseksi erinomainen koostumus. Ilmaa tuotettiin vakioksi säädetyllä 100 psi:n paineella paineilmajärjestelmän avulla. Mikroskoopilla tarkasteltaessa aikaansaadulla pistekuviolla on samankaltaiset ominaisuudet, kuin kuvioinneilla, jotka ovat aiemmin toimineet DIC-menetelmän kanssa. Sisäisiä mittauksia varten valittiin läpinäkyvä silikonikumi (RTV-615) optisen kuvantamisen mahdollistamiseksi näytteen paksuuden läpi. Käytetyt näytteet valmistettiin kaksivaiheisella prosessilla. Aluksi yksi polymeerikerros valettiin moniosaiseen muottiin noin 1,5 mm paksuuteen ja sen annettiin kovettua osittain huoneenlämpötilassa 24 tunnin ajan. Vaikka pinta oli vielä tahmea osittaisen kovettumisen takia, niin siihen ruiskutettiin pistekuvio. Sen jälkeen, kun muste oli kuivunut muutaman minuutin ajan toinen silikonikumia, joka oli myös 1,5 mm paksu kaadettiin ensimmäisen päälle. Aikaansaatu valu jätettiin kovettumaan muutaman päivän ajaksi, minkä jälkeen näytteet poistettiin muotista ja leikattiin lopullisiin mittoihin. (Berfield ym. 2007, s. 54)

Pinnan mikromittakaavassa oleva pistekuviointi kuvattiin käyttäen apuna Olympos SZX-12 stereomikroskooppia ja 640×480 pikselin Sony XC-77 monokromaattista CCD kameraa. Kuvatun pinnan resoluutio oli 10 µm/pikseli, jolloin tarkastelualue oli kooltaan 6,4×4,8 mm. Sisäisen pistekuviointi kuvattiin suurennuskertoimella 3,3, jonka avulla saatiin resoluutioksi 3 µm/pikseli tarkastelualueen ollessa kooltaan 1,9×1,4 mm. Johtuen molempien näytteiden läpinäkyvistä materiaaleista näytteiden taakse asetettiin tasainen valkoinen tausta, joka tarjosi kontrastia mustille pistekuvioinneille testauksen aikana. Nanopartikkeleilla pinnoitetut näytteet kuvattiin Leica DM-R fluoresoivalla mikroskoopilla käyttäen Retigan monokromaattista CCD kameraa, jossa oli 1280×1024 pikselin tarkkuus. Pintapäälystetyille näytteille käytettiin 50-kertaista pitkän matkan objektiivilinssiä ilman relelinssiä, jolloin saavutettiin kuvantarkkuudeksi 134 nm/pikseli tarkastelualueen ollessa 170×140 µm. Sisäinen pistekuviointi kuvattiin hieman eri tavalla lisäämällä 0,63-kertainen relelinssi. Tämä kyseinen muutos kuvaustapaan tuotti resoluutioksi 213 nm/pikseli, kun tarkastelualue oli 270×220 µm. Kaikkien fluoresoivien nanohiukkaskuvioiden tausta oli tumma ja kaikki nanopartikkelipisteet esiintyivät valkoisina virittyneenä, kun näytettä tarkasteltiin mustavalkokameralla. (Berfield ym. 2007, s. 56)

Berfield ym. (2007, s. 62) toteavat yhteenvedossaan, että virittyessään sopivasti nanopartikkelit fluoresoituvat useita kertoja niiden halkaisijaan nähden ja luovat kuvion, joka voidaan kuvata optisella mikroskoopilla ja käytetään hyödyksi DIC-menetelmässä. Fluoresoivien nanohiukkasten käyttö oli merkittävä kehitysaskel, koska hiukkaset mahdollistavat nanomittakaavan siirtymien havaitsemisen. Kyseisten hiukkasten käyttö aiheuttaa vähän häiriöitä tarkasteltavaan rakenteeseen.

6.3 DIC-menetelmän ja valokenttäkameran yhdistelmä

Mikro-objektiiviryhmän lisääminen tavanomaiseen kameraan johtaa plenoptic-kameran muodostumiseen, jota kutsutaan myös valokenttäkameraksi. Tämän tyyppinen suunnittelu mahdollistaa uusia kuvantamismenetelmiä, esimerkiksi digitaalisen uudelleentarkennuksen ja läpinäkyvien kappaleiden tarkastelun vain yhden pikakuvan avulla. Valokenttäkameran rakenne mahdollistaa dramaattisesti syväterävyyden laajentamisen. Tavallisessa kamerassa sumeus on matalaa polttotason läheisyydessä ja kasvaa suuremmaksi, mitä kauemmas polttotasosta siirrytään. Valokenttäkamerassa sumeus toimii juuri päinvastoin. Sumeus on tasoltaan pientä, kun ollaan kaukana polttotasosta ja kasvaa siirryttäessä sen läheisyyteen, jossa sitä rajoittavat mikrolinssien koot. (Bishop ym. 2012, s. 972, Chai ym. 2000, Ng R., 2005)

Guo ym. (2019, s. 19 - 25) tekemässä tutkimuksessaan heidän tarkoituksenaan oli yhdistää DIC-menetelmä ja valokenttäkameran käyttö, jonka avulla tarkasteltavan kappaleen pinta voitaisiin muodostaa uudelleen. Ennen koetta kappaleen pintaan luotiin pistekuviointi. Valokenttäkameran toimintaan vaikuttavat parametrit, kuten mikrolinssit, tarkennus ja linssien aiheuttama vääristymä esi-kalibroitiin. Kokeiden aikana käsittelemättömät kuvat otettiin valokenttäkameran avulla, jonka jälkeen kuvat jaettiin kahteen alakuvaan. Digitaalisen kuvakorrelaatio-tekniikan avulla suoritettiin toisiaan vastaavien alikuvien ominaispisteiden paritus ja kaikkien vastaavien pisteiden kolmiulotteiset koordinaatit laskettiin käyttäen apuna stereonäön periaatetta ja pinnan topografista informaatiota. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että kyseinen metodi pystyy toteuttamaan kolmiulotteisen muotoilun ja mittaamaan kolmiulotteisia muodonmuutoksia. Järjestelmän etuina ovat yksinkertainen rakenne, suuri

syväterävyysalue ja suuri mittauskyky tason suunnasta poispäin olevien muodonmuutosten yhteydessä. Valokenttäkameraa voidaan käyttää myös 3D-DIC-menetelmän kanssa. Valokenttäkamera tallentaa 4D-valokentän, joka sisältää ei pelkästään vain valon intensiteetin ja sijainnin, vaan myös suunnan mihin se on kulkenut. 4D-valokenttä sisältää tietoja rekonstruktiota varten, jotka voidaan saada digitaalisen zoomauksen ja digitaalisen tarkennuksen avulla. Yhteenvedossaan he toteavat, että valokenttäkameran käytöllä saatiin neliulotteista valokenttään liittyvää informaatiota ja DIC-menetelmän algoritmin avulla tarkastelun kohteena olleen kappaleen pinta saatiin rekonstruoitua. Kyseisten menetelmien yhdistämisen seurauksena pystyttiin tarkasti ja kätevästi mittaamaan kolmiulotteisia pinnan muotoja ja muodonmuutoksia. Verrattuna tyypilliseen 3D-DIC-järjestelmään optinen reitti on yksinkertaisempi ja sen operointi on helpompaa. Tutkimuksessa käytetyn järjestelmän avulla voidaan ensin kuvata haluttua kohdetta ja kalibroida se vasta myöhemmin, joka mahdollistaa kuvauksen erityisolosuhteissa. Valokenttäkameran syväterävyysalue on viisi kertaa suurempi, kuin tyypillisessä kamerassa ja sen avulla voidaan mitata suuria tasosta poispäin syntyviä siirtymiä.

6.4 Soveltuvuus venymien mittauksiin

Digitaalinen kuvakorrelaatio-teknologia tarjoaa tällä hetkellä olevista menetelmistä mielenkiintoisimman ja kokonaisvaltaisimman tavan mitata venymiä painetuissa johtimissa. Sen etuihin voidaan katsoa kuuluvan suuri mittatarkkuus, suhteellisen nopea toistettavuus ja se, että mitattavaan kappaleeseen ei tule pistekuviointin lisäksi lisätä ylimääräisiä antureita tai muita laitteita, jotka mahdollisesti heikentäisivät kappaleen ominaisuuksia. Kyseisen teknologian hankintahinta on varmasti korkeampi, kuin muilla esitetyillä menetelmillä, mutta kuvauksien uudelleen toistettavuus ja kyky havaita siirtymiä myös tasosta poikkeavasta suunnasta tekevät siitä hyödyllisimmän tavan mitata venymiä johtimissa. Varsinkin valokenttäkameran yhdistäminen DIC-menetelmän kanssa tarjoaa uudentyyppisen ja monipuolisen tavan mitata venymiä johtimissa.

7 MITTALAITTEITA VALMISTAVAT YRITYKSET

Kappaleessa tarkoituksena on esitellä kolme yritystä, joiden tuotevalikoimaan kuuluvat DIC-menetelmän laitteet ja palvelut. Lisäksi esiteltynä on yritys, jonka tuotteisiin lukeutuvat erilaiset valokenttäkamerat. DIC-menetelmää kauppaavien yritysten suurempi lukumäärä verrattuna valokenttäkameroita tarjoavien yritysten lukumäärään selittyy varmasti sillä, että valokenttäkamerat ovat uutta teknologiaa verrattuna DIC-menetelmään.

7.1 Correlated Solutions

Correlated Solutions nimisen yrityksen pääkonttori sijaitsee Yhdysvalloissa ja heidän tuotteisiinsa lukeutuvat kontaktittomat muotojen ja muodonmuutosten mittaukseen soveltuvat laitteet erinäisille materiaaleille ja laitteille. Kyseiset mittaukset voidaan toteuttaa pituusskaaloissa, jotka vaihtelevat mikrometreistä metreihin ja aika-asteikolla päästään nanosekunteihin asti. Tehokkaiden digitaalisten kuvakorrelaation-järjestelmien lisäksi Correlated Solutions tarjoaa myös lukuisia mittausratkaisuja mm. värähtelymittausten toteutukseen. Correlated Solutionsin tuotevalikoimaan kuuluvat myös kalibrointituotteet, joko itsenäisinä kohteina, kokonaisina setteinä tai osana ”avaimet käteen”-järjestelmää. Heidän tarjoamien tuotteiden sisältö riippuu asiakkaan tarpeista, mm. korkein saatavilla oleva resoluutio on 29MP, venymän ja kuorman kontrollointi, infrapunakyky, väsymiskokeet ja 3D-täyden kentän reaaliaikainen analyysi. (Correlated Solutions, Inc 2018)

7.2 LaVision

LaVision perustettiin vuonna 1989 Saksassa. LaVision on perustamisestaan lähtien ollut johtava laser-kuvantamisjärjestelmien toimittaja monilla eri sovellusalueilla, kuten nestemekaniikassa, palamisessa (autoteollisuus) ja hiukkasdiagnostiikassa (moottorit). Viime aikoina he ovat laajentaneet tuotevalikoimaansa kamerapohjaisia pinnantarkastelujärjestelmiä. LaVisionilla on yrityksenä laaja kokemus laser- ja kameratekniikasta, kuvantamistekniikoista virtauksen analysoinnissa, spektroskopiassa

ja digitaalisessa kuvankäsittelyssä. Yrityksen tarjoamiin tuotteisiin lukeutuvat mm. 2D-/3D-Stereo-digitaaliset kuvakorrelaatio järjestelmät. Järjestelmiin kuuluvat kaikki tarvittavat komponentit: korkean resoluution digitaalikamerat, valaistussyksiköt, synkronointiin tarvittava elektroniikka, jalustat, sekä ohjelmisto tallennukseen ja DIC-laskentaan. (LaVision GmbH, 2018)

7.3 Dantec Dynamics

Dantec Dynamics on tanskalainen yritys, joka kehittää ja myy integroituja mittausjärjestelmiä diagnostiikan ja eri tutkimusalojen käyttöön. Dantec Dynamicsin tuotevalikoimaan kuuluvat digitaalisen kuvakorrelaation-järjestelmät, kuten aiemmin mainituillakin yrityksillä. Heidän tarjoama Q-400 3D-digitaalinen kuvakorrelaatio-järjestelmä on optinen mittauslaite, joka kykenee mittaamaan muotoja, muodonmuutoksia ja siirtymiä kolmiulotteisesti lähes mistä tahansa materiaalista valmistetuista rakenteista ja osista. Kyseistä Q-400-järjestelmää käytetään heidän mukaansa kolmiulotteisten materiaalien ominaisuuksien määrittämisessä veto-, vääntö-, taivutus- tai nämä yhdistävissä kokeissa. Lisäksi muodonmuutos- ja venymäanalyysi voidaan lisätä mm. väsymiskokeisiin ja murtumismekaniikkaan. (Dantec Dynamics A/S, 2019)

7.4 Raytrix

Raytrix perustettiin vuonna 2009 ja he myyvät 3D-valokenttäkameroita teollisuuden ja tutkijoiden käyttöön. Tänä päivänä Raytrix on maailman johtava yritys 3D-valokentän kamerateknologiassa. He tarjoavat asiakkailleen 2D- tai 3D-kamerajärjestelmiä, kuvantamistekniikan ohjelmistoja ja kustomoitua laitteisto- ja ohjelmistokehitystä. Esimerkkinä yrityksen tuotteista mainittakoon 3D-valokenttäkamera R42, joka tarjoaa tehokkaan resoluution, jopa 10 megapikselin tarkkuudella otettaessa 7 kuvaa sekunnissa. (Raytrix GmbH, 2019)

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli löytää mahdollisimman monta menetelmää painettujen johtimien venymien mittaukseen. Painetun elektroniikan valmistuksessa ongelmaksi muodostuvat johtimissa tapahtuvat venymät 3D-muodonmuutosten yhteydessä, jotka syntyvät rakenteen muodon vuoksi, joka yleensä käyttökohteesta riippuen sisältää kolmiulotteisia muotoja.

Ensimmäiseksi tarkastelussa olivat RFID-teknologiaan pohjautuvat venymäanturit, jotka voitaisiin integroida osaksi tarkastelussa olevaa rakennetta. Kyseinen teknologia tarjoaisi mahdollisuuden venymätietojen tarkasteluun etänä esimerkiksi tietokoneen avulla, kun käytettäisiin passiivista RFID-anturia. Heikkoudeksi kyseisen tyyppisille antureille muodostuivat niiden suuri koko, sekä niiden mittatarkkuus. RFID-antureita käytetään pääasiallisesti suhteellisen suurten rakenteellisten venymien mittauksiin, joissa tapahtuu millimetrituokan venymiä. Lisäksi RFID-anturien avulla ei pystytä mittaamaan kokonaisvaltaisesti halutun pinnan alueella tapahtuvia muodonmuutoksia, vaan venymämittaus tapahtuu paikallisesti. RFID-anturia käytettäessä se jouduttaisiin painamaan osaksi tarkasteltavaa kappaletta, jolla puolestaan saattaa olla heikentävä vaikutus tarkasteltavan kappaleen ominaisuuksiin.

Seuraavana tarkasteltiin painettujen grafeeni- ja hiilipohjaisten venymäanturien käyttöä johtimissa syntyvien venymien mittaukseen. Grafeeni- ja hiilipohjaisten venymäanturit pystytään painamaan esimerkiksi muovipohjaisiin materiaaleihin, joka mahdollistaa niiden integroimisen osaksi tarkasteltavaa rakennetta. Lisäksi niiden erinomainen sähköjohtavuus ja kyky kestää mekaanisia muodonmuutoksia tekevät niistä varteenotettavia vaihtoehtoja johtimien venymien mittaukseen. Grafeeni- ja hiilipohjaisilla venymäantureilla pystyttäisiin tarvittaessa mittaamaan myös kokonaisvaltaisesti pinnan alueella tapahtuvia muodonmuutoksia. Heikkoudeksi tälläkin menetelmällä muodostuvat niiden koko, joka mahdollisesti on liian suuri, mikäli tarkasteltava kappaleen koko on millimetrituokassa. Pääasiassa kyseisen tyyllisiä antureita on käytetty lääketieteen sovellutuksissa mittaamaan ihmisten raajojen ja lihasten liikkeitä, mutta kyseiset liikkeet ovat paljon suurempia, kuin johtimissa tapahtuvat venymät.

Viimeisenä mahdollisena menetelmänä johtimien venymän mittaukseen esiteltiin DIC-teknologiaan pohjautuva menetelmä, joka käyttää hyväkseen kameroita siirtymien ja muodonmuutoksien havaitsemiseen. Kyseisen menetelmä pohjautuu kuvien vertailuun, jotka ovat otettu tarkasteltavan kappaleen pinnasta ennen ja jälkeen muodonmuutoksen. Menetelmä vertailee kuvia keskenään ja laskee kappaleen pintaan piirretyn pistekuvion siirtymät ja saa näin ollen selville kappaleen rakenteeseen tapahtuneet muodonmuutokset. Kyseinen menetelmä tarjoaa tarkan ja suhteellisen nopeasti toistettavissa olevan tavan mitata siirtymiä ja muodonmuutoksia kappaleissa. Ennen 2D-muodonmuutoksien mittaukset ovat olleet helposti toteutettavissa, mutta 3D-muodonmuutokset ovat olleet haasteellisia. Nykyään voidaan kuitenkin toteuttaa 3D-muodonmuutosmittauksia käyttäen apuna mm. valokenttäkameran ja DIC-menetelmän yhdistävää tekniikkaa. DIC-menetelmään pohjautuvia järjestelmiä kaupallisesti tarjoavia yrityksiä löytyy ympäri maailman nykyään. Valokenttäkamera-teknologiaa tarjoavia yrityksiä on tällä hetkellä maailmassa vain yksi. DIC-menetelmään pohjautuvia tutkimuksia on tehty menneinä vuosina useita ja se tarjoaakin tällä hetkellä parhaimman mahdollisuuden tutkia painetuissa johtimissa tapahtuvia venymiä.

LÄHDELUETTELO

Ahn J-H., Bae S-H., Kim J-H., Lee H-J., Lee Y., Sharma B., 2013. Graphene-based transparent strain sensor. *Carbon*, Vol. 51, s. 236–242.

Al-Hamry A., Benchirouf A., Bouhamed A., Bu L., Dinh T., Gerlach C., Kanoun O., Müller C., Sanli A., 2014. Flexible Carbon Nanotube Films for High Performance Strain Sensors. *Sensors*, Vol. 14, s. 10042–10072.

Asama H., Ikemoto Y., Itoh H., Lin X., Mishima T., Morishita S., Murakami H., Okamoto H., Suzuki S., 2009. Force sensor system for structural health monitoring using passive RFID tags. *Sensor Review*, Vol. 29, Issue 2, s. 127–136.

Asundi A., Pan B., Qian K.M., Xie H.M., 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, Issue 6, Article number 062001.

Berfield T.A., Braun P.V., Lambros J., Patel J.K., Shimmin R.G., Sottos N.R., 2007. Micro- and nanoscale deformation measurement of surface and internal planes via digital image correlation. *Experimental Mechanics*, Vol. 47, Issue 1, s. 51–62.

Bishop T.E., Favaro P., 2012. The light field camera: Extended depth of field, aliasing and superresolution. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 34, Issue 5, s. 972–986.

Björninen T., Merilampi S., Ruuskanen P., Sydänheimo L., Ukkonen L., 2011. Embedded wireless strain sensors based on printed RFID tag. *Sensor Review*, Vol. 31, Issue 1, s. 32–40.

Chai J.X., Chan S.C., Shum H.Y., Tong X., 2000. Plenoptic sampling. *Proceeding of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, s. 307–318.

Chao Y.J., Luo P.F., Peters W.H., Sutton M.A., 1993. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision. *Experimental Mechanics*, Vol. 33, Issue 2, s. 123–132.

Chee K., Cui M., Foo C., Kang W., Lee P., Wang J., Wang X., Yan C., 2014. Highly Stretchable Piezoresistive Graphene-Nanocellulose Nanopaper for Strain Sensors. *Advanced Materials*, Vol. 26, Issue 13, s. 2022–2027.

Chen F., Chen X., Feng X., Xie X., Yang L., 2013. Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, Issue 9, s. 1044–1052.

Cheng T., Gao Y., Su Y., Xu X., Zhang Q., Zhang Y., 2015. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 65, s. 73–80.

Correlated Solutions, Inc., 2018. Kotisivu [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: Correlated Solutions, Inc. Saatavissa: <https://www.correlatedsolutions.com> [viitattu 9.4.2019]

Dantec Dynamics A/S, 2019. Kotisivu [verkkodokumentti]. Tanska: Dantec Dynamics A/S. Saatavissa: <https://www.dantecdynamics.com> [viitattu 9.4.2019]

Dyskin A.V., Hassan G.M., MacNish C.K., Pasternak E., Shufrin I., 2018. Discontinuous digital image correlation to reconstruct displacement and strain fields with discontinuities: Dislocation approach. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 189, s. 273–292.

Ganz S., Lupo D. & Nisato G., 2016. Organic and printed electronics. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 580 s. ISBN 978-981-4669-74-0

Gao J., Nilsson H-E., Sidén J., 2010. Printed Temperature Sensors for Passive RFID tags. *Proceeding of 27th conference in progress in electromagnetics research symposium*, s. 835–838.

Guo B., Liu Z., Zhao J., 2019. Three-dimensional digital image correlation method based on a light field camera. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 116, s. 19–25.

Hassan G.M., 2019. Digital image correlation for discontinuous displacement measurement using subset segmentation. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 115, s. 208–216.

Kamyshny A., Magdassi S., 2014. Conductive nanomaterials for printed electronics. *Small*, Vol. 10, Issue 17, s. 3515–3535.

Kikuta H., Kitagawa A., Kitamura K., Yoneyama S., 2006. Lens distortion for digital image correlation by measuring rigid body displacement. *Optical Engineering*, Vol. 45, Issue 2, artikkeli nro. 023602.

Knauss W.G, Vendroux X., 1998. Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation. *Experimental Mechanics*, Vol. 38, Issue 2, s. 86–92.

LaVision GmbH, 2018. Company [verkkodokumentti]. Saksa: LaVision GmbH. Saatavissa: www.lavision.de/en/company.php [viitattu 9.4.2019]

Li X., Wang K., Wang L., Wang Y., Wu D., Yang T., Zhu H., Zhu M., 2014. Wearable and Highly Sensitive Graphene Strain Sensors for Human Motion Monitoring. *Advanced Functional Materials*, Vol. 24, Issue 29, s. 4666–4670.

Merilampi S., Björninen T., Haukka V., Ruuskanen P., Ukkonen L., Sydänheimo L., 2010. Analysis of electrically conductive silver ink on stretchable substrates under tensile load. *Microelectronics Reliability*, Vol. 50, Issue 12, s. 2001–2011.

Ng R., 2005. Fourier slice photography. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, Issue 3, s. 735–744.

Orteu J.J., 2009. 3-D computer vision in experimental mechanics. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 47, Issue 3-4, s. 282–291.

Orteu J.J., Schreier H.W., Sutton M.A., Tiwari V., Yan J.H., 2008. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, Issue 10, s. 746–757.

Pan B., Qian K., Wang Z., Wang Z., Xie H., 2008. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics Express*, Vol. 16, Issue 10, s. 7037–7048.

Peters W.H., Ranson W.F., 1981. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*, Vol. 21, Issue 3, s. 427–431.

Raytrix GmbH, 2019. Kotisivu [verkkosivu]. Saksa: Raytrix GmbH. Saatavissa: <https://raytrix.de> [viitattu 9.4.2019]

RFID Lab Finland ry, 2016. Mitä on RFID? [verkkodokumentti]. Vantaa: RFID Lab Finland ry. Saatavissa: <http://www.rfidlab.fi/rfid-teknologia/mita-on-rfid/> [viitattu 14.3.2019]

Want R., 2006. An introduction to RFID technology. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 5, Issue 1, s. 25–33.

Yoneyama S., 2016. Basic principle of digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement. *Advanced Composite Materials*, Vol. 25, Issue 2, s. 105–123.